



HAL
open science

Etude de l'érosion interne: apport du projet Eniroh

J.J. Fry, D. François, Didier Marot, Stéphane Bonelli, P. Royet, C. Chevalier,
L. Deroo

► **To cite this version:**

J.J. Fry, D. François, Didier Marot, Stéphane Bonelli, P. Royet, et al.. Etude de l'érosion interne: apport du projet Eniroh. Vingt-cinquième congrès des Grands Barrages, Jun 2015, Stavanger, Norvège. pp.486-507. hal-01318294

HAL Id: hal-01318294

<https://hal.science/hal-01318294>

Submitted on 19 May 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

COMMISSION INTERNATIONALE
DES GRANDS BARRAGES

VINGT-CINQUIÈME CONGRÈS
DES GRANDS BARRAGES
Stavanger, Juin 2015

ÉTUDE DE L'ÉROSION INTERNE : APPORT DU PROJET ERINOH (*)

Jean-Jacques FRY
EDF

Daniel FRANCOIS
EDF

Didier MAROT
GeM,

Stéphane BONELLI, Paul ROYET
IRSTEA,

Christophe CHEVALIER
IFSTTAR,

Luc DEROO,
ISL

FRANCE

1. INTRODUCTION

L'érosion interne est le premier mécanisme de rupture des barrages en remblai recensés par l'enquête Erinoh. Erinoh est un projet de recherche en France dédié à l'Erosion Interne des Ouvrages Hydrauliques. Ce projet mis en place de 2006 à 2012, un an après le symposium organisé par EDF à Aussois [1] a fortement contribué aux réunions annuelles du groupe de travail du club européen dédié à ce sujet [2], au bulletin technique 164 de la CIGB et aux synthèses de Bonelli [3 et 4].

(*) *Study of internal erosion: contribution from Erinoh Project.*

Erinoh a étudié, pendant 6 ans en laboratoire et sur site, les quatre mécanismes d'initiation, illustrés sur la Figure 1 et adoptés lors du symposium d'Aussois de 2005 [1]:

- l'érosion de conduit par écoulement localisé,
- l'érosion régressive,
- l'érosion de contact entre deux sols,
- la suffusion.

L'érosion interne et les mécanismes précédents sont des situations particulières de l'érosion, comme le rappelle la Fig.2.

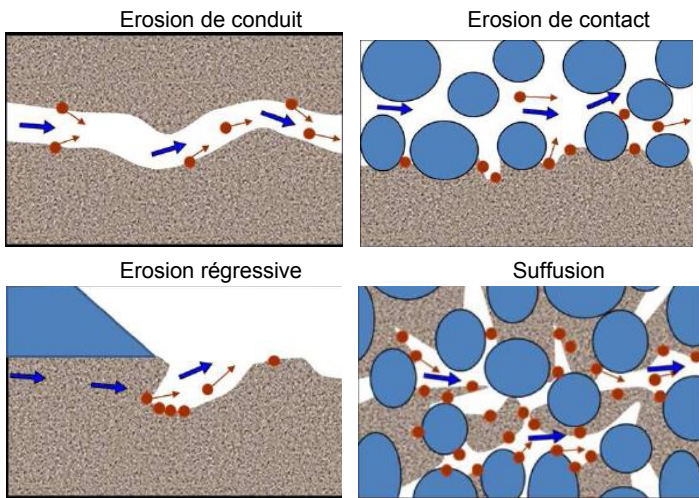


Fig. 1
Les 4 mécanismes d'initiation [5]
The 4 initiating mechanisms [5]

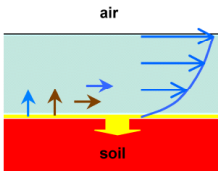
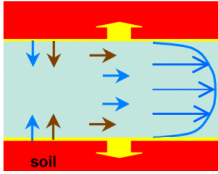
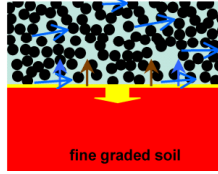
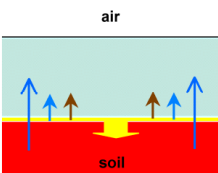
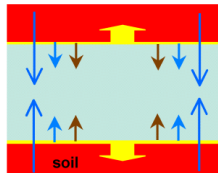
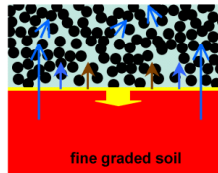
Sollicitation hydraulique sur l'interface			
Écoulement	à surface libre	en charge	interstitiel
tangentiel à l'interface	 <p>air</p> <p>soil</p> <p>Erosion externe</p>	 <p>soil</p> <p>érosion de conduit</p>	 <p>fine graded soil</p> <p>érosion de contact</p>
Normal à l'interface	 <p>air</p> <p>soil</p> <p>érosion régressive globale</p>	 <p>soil</p> <p>érosion régressive chenal</p>	 <p>fine graded soil</p> <p>Absence de filtration</p>

Fig. 2
Les situations d'érosion [5]
Situations of erosion [5]

Ce rapport introduit les travaux d'Erinoh et encourage le lecteur à se procurer les trois guides qui en sont issus : le premier couvre les essais de laboratoire [5], le second est centré sur les méthodes de détection [6] et le dernier relate les approches pour l'ingénierie [7].

Le rapport est structuré en cinq chapitres. Après cette introduction, le second chapitre tire les leçons d'une enquête sur les incidents. Le chapitre suivant recommande les essais de laboratoire requis pour évaluer la résistance à l'érosion interne. Le chapitre 4 présente un modèle d'interprétation des essais basé sur l'énergie dissipée. Enfin le chapitre 5 introduit quelques outils d'évaluation du risque d'érosion.

2. RETOUR D'EXPÉRIENCE DES INCIDENTS

2.1. LA BASE DE DONNÉES ERINOH

288 fiches d'incident ont été renseignées, dont 16 portant sur les grands barrages, 30 sur les petits barrages, 32 sur les digues de canal et 207 sur les digues fluviales. Les cas reportés viennent très largement de France avec

quelques fiches concernant d'autres pays. Y sont relatés 198 cas de rupture, 32 accidents et le reste concerne des dysfonctionnements (anomalies ne nécessitant pas forcément la mise en sécurité du barrage) sur une période allant de 1846 à 2014. Si l'érosion interne a causé moins de ruptures et beaucoup plus de dysfonctionnements et d'accidents que l'érosion externe, c'est probablement parce que sa cinétique est moins rapide que celle de la surverse (Tableau 1).

Tableau 1
Contenu de la base de données d'incidents Erinoh

Type d'incident	Érosion interne	Érosion externe	Érosions internes & externe	Glissement	Inconnu
rupture	48	80	11	0	59
accident	23	5	0	2	2
dysfonctionnement	36	1	0	0	4

Les 131 incidents d'érosion interne se répartissent en 38 brèches totales, 16 brèches partielles, 4 renards causant la rupture, 22 renards sans rupture, 4 renards avec fontis, 16 fontis, 6 érosions du talus aval, 4 glissements du talus aval et 21 cas divers ou indéterminés. Sur les 38 brèches totales, 27 sont apparues en crue. Sur 33 ruptures, 25 ont été initiées dans le corps de remblai, dont 2 seulement en crête, deux au contact de la fondation, 3 seulement dans la fondation et 5 le long d'une conduite. Les 27 ruptures par érosion interne auraient été initiées par 15 érosions de conduit, 7 érosions régressives, 4 suffusions et 1 érosion de contact : cette chronologie donne un aperçu de la dangerosité des 4 mécanismes. Pourquoi 31 érosions de conduit (renards) n'ont pas mené à la rupture ? 4 seulement ont vidé la retenue, 3 n'en n'ont pas eu le temps car la crue était trop courte, 13 à travers le remblai ont été suffisamment lentes pour être stoppées et une seule s'est développée et stabilisée autour d'une conduite. Il importe d'expliquer l'arrêt du développement de certains conduits dans les fondations fluvio-glaciaires par le fait qu'il s'agit plutôt de suffusions de sable et de gravier dans des horizons de blocs. L'importance de la conception est soulignée par la proportion de remblais homogènes sans filtre dans les ruptures, qui est de 50 sur 58 ruptures, et de trois incidents sur quatre. Les remblais en terre avec masque amont représentent 7% des ruptures et 5% des incidents. Derrière ces chiffres, le filtre apparaît la principale barrière contre l'érosion interne : aucune rupture n'a été constatée sur un remblai équipé de filtre. Il existe cependant 9 incidents de remblais avec filtre, dont la moitié serait causée par un problème d'exécution.

2.2. LES RUPTURES DE BARRAGES PAR ÉROSION INTERNE

Pour les barrages petits et grands, l'érosion interne est de loin le mécanisme de rupture le plus dangereux (Tableau 2). Les 18 ruptures ne

proviennent que de l'érosion, dont 11 de l'érosion interne, 3 de l'érosion externe et 4 des deux. Sur 14 remblais rompus, 9 sont des remblais homogènes et 2 des remblais en terre à masque amont : les remblais rompus étaient sans filtre. Sur 12 ruptures où la localisation de l'initiation est renseignée, la moitié vient du remblai, un tiers du contact avec une conduite et un sixième de la fondation. Sur 12 ruptures où le mécanisme d'initiation est décrit, 7 sont des érosions de conduit, 4 des érosions régressives et 1 vient de la suffusion.

Tableau 2
Les mécanismes à l'origine des incident sur les barrages

Mécanisme	Total	érosion interne	érosion externe	érosions internes & externes	glissement	indéterminé
nombre	49	36	6	4	2	1
%	100	74	12	8	4	2

2.3. LES BRÈCHES ET FOSSES D'ÉROSION DES DIGUES DE PROTECTION FLUVIALES

En 2014, la base recense 207 cas d'incidents sur des digues fluviales, survenus en France entre le 19^{ème} siècle et aujourd'hui, sans pour autant être exhaustive. L'érosion externe (surverse) est majoritairement à l'origine de ces incidents, mais dans un nombre important de cas anciens, l'origine reste indéterminée. Au total, 70% de ces incidents a conduit à la brèche totale.

Tableau 3
Les mécanismes à l'origine des incidents sur les digues fluviales

Mécanisme	Total	érosion interne	érosion externe	érosions internes & externes	indéterminé
nombre	207	59	77	6	65
%	100	29	37	3	31

Les brèches représentent 60% des incidents d'érosion interne des digues fluviales (48 décrits sur 65 cas attestés), les érosions de conduit sans brèche représentent 22%. La présence de terriers, de racines d'arbres ou de conduits traversant la digue est signalée dans un tiers des cas (mais compte tenu du nombre de cas insuffisamment renseignés, cette proportion est probablement plus élevée). Une des informations majeures que nous fournit l'exploitation de la base de données concerne la forme des brèches dans les digues fluviales. Leur largeur peut atteindre 100 fois la hauteur de la digue, mais sans qu'il soit possible d'établir de lien fort entre les dimensions de la brèche et celles de la digue. Pour

les cas répertoriés de rupture par surverse, la hauteur de surverse ne semble pas un facteur explicatif de l'importance de la brèche, mais il s'avère qu'une surverse de seulement 0,1 m peut initier des brèches immenses (plusieurs centaines de mètres de longueur). Enfin, contrairement aux barrages où la fondation souvent rocheuse limite la profondeur de la brèche, sur les digues fluviales les fosses d'érosion peuvent atteindre des dimensions considérables : une longueur et une largeur qui sont du même ordre de grandeur que la longueur de la brèche, une profondeur qui peut dépasser plusieurs mètres (avec un maximum rapporté de 15 m). Les formules empiriques utilisées dans le domaine des barrages ne peuvent donc définitivement pas s'appliquer au domaine des digues et il convient de développer des modèles numériques reproduisant au mieux les phénomènes physiques et intégrant l'érosion de la fondation à celle du remblai.

3. LES ESSAIS D'ÉROSION INTERNE EN LABORATOIRE

Trois essais d'érosion et de dispersion sont actuellement définis par des normes : l'essai de désagrégation de l'ASTM D6572-06 (Crumb Test), l'essai d'érosion de trou d'épingle de la norme ASTM D4647-93 (Pin Hole Test), et l'essai de Jet pour l'érosion externe par l'ASTM D5852-00 (Jet Erosion Test). Or quatre mécanismes étaient à étudier, il manquait donc des appareillages. Erinox a comblé cette lacune en développant 17 appareillages de laboratoire. Les essais les plus aptes à quantifier la résistance à l'érosion de sols réels d'ouvrages hydrauliques existants, avec des échantillons remaniés et même intacts, sont rappelés ci-dessous, sauf les essais d'érosion régressive, largement étudiés en Hollande et publiés par Deltares [8].

3.1. ESSAI D'ÉROSION DE TROU (HET)

Irstea et Ifsttar ont développé l'essai HET préconisé par Fell [1] pour reproduire l'érosion de conduit. L'intérêt est de déterminer les deux paramètres utilisés pour étudier la sûreté d'un ouvrage hydraulique vis à vis de l'érosion de conduit : le seuil d'initiation d'érosion, la contrainte critique τ_c (Pa) et la cinétique d'érosion, le coefficient d'érosion C_e (s/m) (Eq. [1]) ou indice d'érosion I_e (Eq. [2]) issus de l'expression la plus simple de la loi d'érosion reliant $\dot{\varepsilon}$, le taux d'érosion, qui est la masse de sol sec érodé par unité de surface latérale du conduit et unité de temps (unité SI en kg/m²/s) et τ , la contrainte de cisaillement que l'écoulement applique sur l'interface (unité SI en Pa):

$$\dot{\varepsilon} = C_e (\tau - \tau_c) \quad [1]$$

$$I_e = -\log_{10}(C_e) \quad [2]$$

Le principe consiste à réaliser un trou de 3 à 6 mm dans un échantillon décimétrique de sol intact ou remanié, simulant un défaut, et de le soumettre à une sollicitation hydraulique provoquant son érosion. Un débit est imposé dans l'essai développé par Irstea, le trou est agrandi par érosion, ce qui provoque une diminution de la vitesse d'écoulement, donc de la contrainte d'érosion. La turbidité augmente au début de l'essai, atteint un maximum, puis décroît jusqu'à une valeur considérée comme non significative (<5 NTU). La cinétique est différente dans l'essai développé par Ifsttar où la chute de pression est imposée. Cet essai est indispensable pour caractériser la résistance à l'érosion interne de toute terre utilisée en étanchéité.

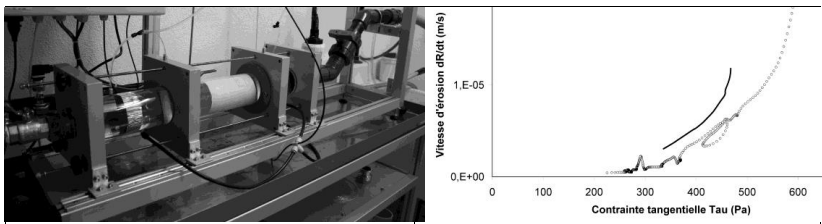


Fig. 3
L'essai HET et ses résultats [5]
The Hole Erosion Test and its outputs [5]

3.2. ESSAI D'ÉROSION DE CONTACT (TEC/CET)

L'érosion de contact est mesurée entre 2 volumes de sol de 4 x 30 x 60 cm dans l'appareillage représenté Fig. 4 et constitué d'une cellule en acier de longueur $L=70$ cm, de largeur $B=30$ cm et de hauteur $H=25$ cm. Une contrainte est appliquée par pression d'eau sur la face supérieure via une membrane. Une face latérale est munie d'une vitre afin d'observer l'érosion. Cette cellule est percée de 2 ouvertures de 4 x 30 cm connectées à l'amont à un réservoir à niveau constant par un divergent, à l'aval à l'évacuation par un convergent. La vitesse de Darcy critique U_c (m/s) caractérise l'initiation de l'érosion de contact. U_c est déduite du gradient critique grâce à la loi d'écoulement du sol grossier, classiquement de la forme dite de Forchheimer avec les paramètres à identifier expérimentalement.

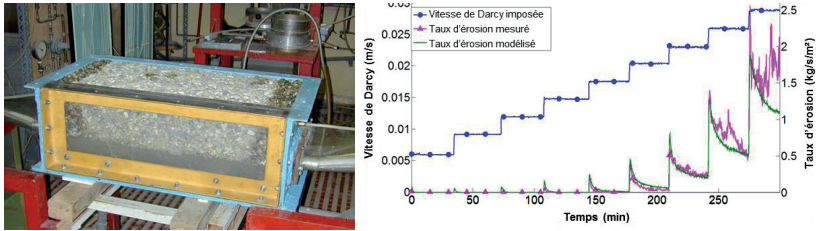


Fig. 4
L'essai TEC et ses résultats [5]
The Contact Erosion Test CET and its outputs [5]

3.3. ESSAI DE SUFFUSION A L'OEDO-PERMÉAMÈTRE (SFET)

L'appareillage s'inspire du Oedometer Suffusion Test de Fannin et Li [9]. Un échantillon posé sur une embase munie d'une grille dans une cellule oedoperméamétrique est chargé verticalement, saturé, consolidé en condition oedométrique puis sollicité par un écoulement descendant à gradient hydraulique constant augmenté par palier. La masse des particules érodées, l'évolution de la pression interstitielle de 14 prises, la densité et les déformations verticales induites par l'érosion sont mesurées et retranscrites en fonction du gradient hydraulique local, global ou de l'énergie transmise. Les résultats mettent en évidence ou non suivant le sol un gradient critique au delà duquel le départ de fines est conséquent. La valeur de ce gradient dépend du sol mais aussi des conditions de mise en place, notamment des contraintes appliquées et des conditions aux limites.

3.4. L'ESSAI DE JET (JET)

L'essai de Jet mis au point par Hanson [10] est complémentaire à l'essai HET. Il mesure les paramètres de base (contrainte critique et coefficient d'érosion) en surface sur des matériaux en place ou sur des matériaux sans cohésion. Le mécanisme d'érosion du jet diffère de celui du HET, ainsi les résultats issus de ces 2 essais ne sont pas identiques pour le même sol.



Fig. 5
L'essai de Jet [10]
The JET [10]

3.5. L'ESSAI D'ARRÊT D'UNE ÉROSION DE CONDUIT PAR INJECTION

Un banc expérimental a été développé pour étudier le blocage d'un écoulement préférentiel ou d'un renard par l'injection ponctuelle de produits de colmatage. La conduite d'écoulement, particulièrement adaptée aux sols grossiers, avec 3 m de longueur (Fig. 6), est composée de six modules en plexiglas de 18 cm de diamètre intérieur et de 50 cm de longueur et est équipée de deux débitmètres en entrée et d'un turbidimètre en sortie. Chaque module est équipé de 2 prises de pression. Le dispositif d'injection est constitué d'un réservoir en plexiglas de 80 cm de hauteur et de 40 cm de diamètre intérieur. Le coulis de colmatage est injecté à pression contrôlée en appliquant une pression d'air régulée dans le réservoir.



Fig. 6

Mise en place du matériau dans la conduite d'essai d'injection d'une fuite
Material placing in the conduit for injection test of concentrated leak

Les résultats permettent d'accéder aux conditions d'injection d'un couple matériau granulaire-produit injecté, qui font que le bouchon est définitif, temporaire ou inexistant.

3.6. COMPARAISON DES APPAREILLAGES HET, EFA ET CET

Quatre sables argileux avec une kaolinite et une illite ainsi que du limon d'Orly ont été testés à l'aide de deux Hole Erosion Test (à Irstea et Ifsttar), du Contact Erosion Test (au LTHE) et de l'Erosion Function Apparatus [11] (à l'ESTP). Cet exercice de comparaison permet une réflexion sur l'emploi de ces appareillages. La dispersion de résistance des coefficients d'érosion est plus faible sur le limon d'Orly, qui est le seul matériau naturel, les autres sols sont artificiels et la dispersion de leurs propriétés est conditionnée à leur texture et à la façon de les mélanger. Ensuite la dispersion est plus faible, car la sollicitation

hydraulique y est identique, mais n'est pas négligeable entre les deux HET, ce qui montre primo que les paramètres de la loi d'érosion sont une simplification, car ils changent avec la nature de la sollicitation hydraulique, secundo que la différence de mode opératoire et d'interprétation a une certaine influence. En conclusion, il est prudent actuellement de considérer que la dispersion expérimentale est grande, que la loi d'érosion est une simplification et qu'il importe de garder une marge de sécurité et de raisonner en classe d'érosion.

Tableau 4
Comparaison des paramètres obtenus avec les divers appareillages

Contrainte critique t_c (Pa)	HET (Irrstea)	HET (Isttar)	EFA (ESTP)	CET (LTHE)
95% sable + 5% kaolinite	effondrement	effondrement	0,1	0,3
75% sable + 25% kaolinite	3,7	4,5	0,4	0,6
70% sable + 30% kaolinite	5,2	30	0,6	0,9
95% sable + 5% illite	effondrement	10	0,2	0,2
Limon d'Orly	6,1	effondrement	0,2	2
Coef. d'érosion k_{er} (E-03 s/m)	HET Irrstea	HET Isttar	EFA	CET
95% sable + 5% kaolinite	effondrement	effondrement	0,18	8,6
75% sable + 25% kaolinite	1,26	0,24	0,15	8,6
70% sable + 30% kaolinite	0,25	0,18	0,003	9,5
95% sable + 5% illite	effondrement	1,96	0,19	5,3
Limon d'Orly	0,52	effondrement	0,2	0,32

3.7. COMPARAISON DU HET ET DU JET

La comparaison des essais d'érosion précédents montre une dispersion plus grande des paramètres d'érosion que celle des paramètres géotechniques habituels. Or la classification des risques de rupture de barrages en terre est basée sur la valeur du coefficient d'érosion mesuré soit par l'essai HET dans le bulletin technique 164 de la CIGB soit à l'aide du JET [10]. Il importe donc de vérifier que le jugement de l'ingénieur est identique avec l'une ou l'autre classification. A cette fin, CEATI, EDF et USBR ont organisé une comparaison de ces deux appareillages en finançant la thèse de Regazzoni [12]. Sept sols naturels couvrant une large plage de sensibilité à l'érosion ont été testés. La comparaison des résultats montre que l'indice de résistance à l'érosion, I_e (Eq. [2]), est en général plus faible avec le JET (I_{JET}) que celui obtenu avec le HET (I_{HET}) ; en pratique la masse érodée avec le JET est en général 1,5 à 3 fois plus forte qu'avec le HET, à durée et contrainte identiques [13]. Par ailleurs, les valeurs du seuil d'érosion, la contrainte critique, sont en moyenne 50 fois plus

faibles avec le JET que celles mesurées avec le HET [13]. En revanche, la hiérarchie de la classification de la résistance à l'érosion est globalement identique pour les deux appareillages, malgré qu'il n'y ait pas stricte analogie entre les classes d'érosion. Les conditions expérimentales et la variabilité spatiale expliquent en partie la dispersion entre les résultats du HET et du JET [14]. Pour réduire cette part importante de variabilité, il est conseillé pour les deux appareillages de conduire trois essais à charge hydraulique différente sur des échantillons préparés de manière identique.

3.8. APPLICATION DU HET OU DU JET AU CALCUL DE RUPTURE PAR ÉROSION

La comparaison de l'utilisation des appareillages s'est portée ensuite sur des barrages qui ont subi une rupture. Il est essentiel de confronter les paramètres de laboratoire à ceux issus du calcul en retour de l'érosion jusqu'à la rupture de deux barrages pour juger de leur domaine d'application. Le barrage de Teton s'est rompu en 1976, après l'érosion interne de son noyau. La modélisation de cette rupture [4] aboutit à un indice de résistance à l'érosion $I_e=2.9$. Il est intéressant de noter que cette valeur est intermédiaire entre celles du JET, $2.5 < I_{JET} < 2.9$ et celles du HET $3.6 < I_{JET} < 3.8$. La valeur du JET est plus sécuritaire et plus proche que celle du HET. Un remblai d'essai homogène a été construit en moraine et testé à la rupture en 2003 à Rossaga en Norvège. La courbe de débit de rupture a été retrouvée avec un coefficient d'érosion compris entre 10^{-2} et 4.10^{-2} m/s et une contrainte critique comprise entre 0 et 5 Pa. Les essais HET donnent sur ce matériau un coefficient d'érosion compris entre $0.9 \cdot 10^{-2}$ et 3.10^{-2} m/s et une contrainte critique inférieure à 1 Pa. L'adéquation est très bonne Bonelli [4] trouve que la plage de l'indice d'érosion déduite du calcul en retour des ruptures de barrage est comprise entre 1.6 et 3.0, alors que celle du laboratoire est comprise entre 1 et 6. Est-ce un effet d'échelle, ou une absence de rupture des barrages en argile résistante à l'érosion ou bien est-ce une limite du modèle? Dans l'attente d'une réponse, il est prudent, pour les indices de résistance à l'érosion supérieurs à 3, de garder pour les analyses de rupture les valeurs les plus faibles

3.9. ESSAI DE DÉSAGRÉGATION

L'analyse des écarts entre les résultats des essais d'érosion met aussi en évidence une influence forte de la structure du sol et du degré de saturation. Les écarts sont plus faibles pour les sols dispersifs, a contrario ils augmentent si la saturation a tendance à désagréger le sol en mottes. Cette désagrégation d'autant plus forte que le degré de saturation est faible contribue plus à l'érosion du JET qu'à l'érosion du HET. Pour mieux caractériser cette désagrégation Ifsttar a développé un essai proche du crumb test, qui la visualise et la quantifie (Enhanced Crumb Test Fig. 7).

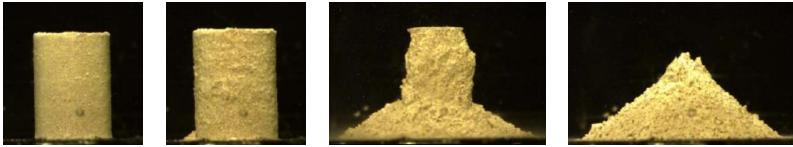


Fig. 7

Photographies de l'essai de désagrégation après 0, 10, 30 et 90 minutes
Photography of the Enhanced Crumb test at t= 0, 10, 30 and 90 min

4. APPROCHE ÉNERGÉTIQUE DE L'ÉROSION INTERNE

En s'interrogeant sur l'origine du biais entre HET et JET, il est apparu qu'une des causes est la difficulté de prise en compte de la perte de charge qui initie l'érosion dans les deux essais, c'est-à-dire la difficulté de représentation de la turbulence, qui s'exprime, non pas uniquement avec la moyenne de la contrainte de cisaillement dans une direction, mais aussi avec les valeurs maximales du cisaillement et des tractions dans les trois directions correspondant à des moyennes plus un certain nombre d'écart types. En attendant de clarifier ces points, il est commode de quantifier l'érosion et la sensibilité à l'érosion en fonction de l'énergie dépensée, comme Annandale [21] l'a fait pour les roches ou comme Hoffmans [20] utilise l'énergie turbulente pour quantifier l'érosion des sols.

4.1. PRINCIPE DE L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

L'analyse proposée par Marot et al. [15] est basée sur la détermination de l'énergie dissipée par le fluide et sur la mesure de la masse érodée. Un volume V de fluide, de masse M possède une surface de contact S avec son environnement. Cette surface est orientée par son vecteur normal, \vec{n} , orienté du fluide vers l'environnement. L'énergie dissipée par le fluide entre l'entrée et la sortie du système étudié pendant un temps dt peut être exprimée par :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_{Mass} \left(e_{int} + \frac{w^2}{2} + \bar{g} \bar{z} \right) dM = \frac{\partial}{\partial t} \iiint_{Volume} \left(e_{int} + \frac{w^2}{2} + \bar{g} \bar{z} \right) \rho dV + \iint_S \left(e_{int} + \frac{w^2}{2} + \bar{g} \bar{z} \right) \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) . dS \quad [4]$$

et

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE_{Ther}}{dt} + \frac{dW_{intra\ fluide}}{dt} + \frac{dW_{érosion}}{dt} \quad [5]$$

avec E_{Ther} : énergie thermique échangée entre le système et l'environnement, $W_{\text{intra fluide}}$: travail dissipé par viscosité et turbulence au sein du fluide, $W_{\text{érosion}}$: travail d'érosion à l'interface fluide-sol, e_{int} : énergie interne du fluide, r : masse volumique du fluide, U : vitesse du fluide de composantes (u, v, w), g : accélération de la pesanteur, z : coordonnées. Afin de simplifier l'équation, la température et donc l'énergie interne sont supposées constantes pour le volume considéré. Le système pouvant être considéré comme adiabatique, seul le travail mécanique entre l'entrée et la sortie du système est considéré par la suite. L'hypothèse d'un écoulement permanent permet de négliger la variation temporelle de l'énergie cinétique et la masse volumique du fluide est supposée constante. L'Eq. [4] de la puissance dissipée peut donc être réécrite sous la forme :

$$\frac{dW_{\text{intrafluide}}}{dt} + \frac{dW_{\text{érosion}}}{dt} = \iint_S \left(\frac{w^2}{2} + \bar{g}z + \frac{P}{\rho} \right) \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) dS \quad [6]$$

4.2. ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DE LA SUFFUSION

Eq. [6] est appliquée entre la section amont A et la section aval B de l'échantillon testé qui sont de même taille et parallèles [16]. La conservation du débit et la faiblesse du nombre de Reynolds permettent d'aboutir à l'expression de la dérivée temporelle du travail d'érosion, appelée puissance d'érosion, où $DP = P_A - P_B$, $Dz = z_A - z_B$, et Q est le débit du fluide.

$$\frac{dW_{\text{érosion}}}{dt} = \rho g \Delta z Q + Q \Delta P \quad [7]$$

4.3. ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DU HET

Eq. [6] est appliquée entre les 2 points de mesures de la charge situés de part et d'autre de l'échantillon testé. La conservation du débit entre la partie à l'amont et la partie à l'aval de l'échantillon permet de supposer une vitesse moyenne constante entre ces deux points. Au cours de l'essai, l'écoulement est horizontal et dans la gamme de débit correspondant aux essais HET, la perte de charge par frottement au sein de la conduite est estimée suivant deux méthodes à 25% de la perte de charge totale mesurée lors des essais HET [15]. En conséquence, la puissance d'érosion pour un essai HET peut être exprimée avec P_{amont} et P_{aval} , les pressions respectivement à l'amont et à l'aval de l'échantillon par :

$$\frac{dW_{\text{érosion}}}{dt} = 0.25(P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}})Q \quad [8]$$

4.4. ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DU JET

Dans le cas de l'essai JET, Eq. [6] est appliquée entre l'orifice du jet et le trop plein du réservoir contenant l'échantillon [15]. Un jet situé face à une interface fluide-sol subit une déviation, qui génère un accroissement de la contrainte de cisaillement et de grandes variations de pression, que nous supposons responsables de l'érosion. Lorsqu'un jet est face à un mur, la contrainte de cisaillement au niveau du mur s'accroît linéairement en fonction de la distance à l'axe du jet r jusqu'à une valeur maximale obtenue pour $r=0,14J$, avec J : profondeur par rapport à l'orifice du jet [17]. De plus, lorsque que le rapport r/J s'accroît de 0 à 0,14, la pression au niveau du mur décroît rapidement de 90% par rapport à la valeur de la pression au centre du jet. Ainsi pour une profondeur J et dans la zone définie à partir de l'axe du jet par la distance latérale $r \leq 0,14J$, l'énergie dissipée est supposée provoquer l'érosion et la puissance correspondante s'exprime par :

$$\frac{dW_{erosion}}{dt} = 2\pi \int_0^{0,14J} \frac{u^2}{2} \rho (\vec{U} \cdot \vec{n}) r dr = \pi \rho u(0,J)^3 \int_0^{0,14J} \left[\exp\left(-0,693\left(\frac{r}{bu}\right)^2\right) \right]^3 r dr \quad [9]$$

Pour $J < J_P$, $u(0,J) = u(0,0)$ avec $u(0,0)$: vitesse initiale à l'origine du jet. Pour $J > J_P$, $u(0,J)$ est déterminée par le rapport $u(0,0) J_P/J$ proposé par HANSON et COOK [18].

4.5. CARACTÉRISATION DE LA SUFFUSION PAR L'APPROCHE ÉNERGÉTIQUE

Pour chaque essai de suffusion, l'énergie dissipée par le fluide par érosion peut être déterminée par intégration temporelle de la puissance d'érosion sur la durée totale de l'essai. La Fig. 8(a) représente la masse sèche d'argile érodée cumulée en fonction de l'énergie dissipée pour des essais réalisés sur des échantillons sablo-argileux de longueurs différentes [16]. Une corrélation linéaire peut être exprimée entre la masse sèche d'argile érodée et l'énergie dissipée. Cette corrélation ne dépendant pas de la longueur des échantillons testés.

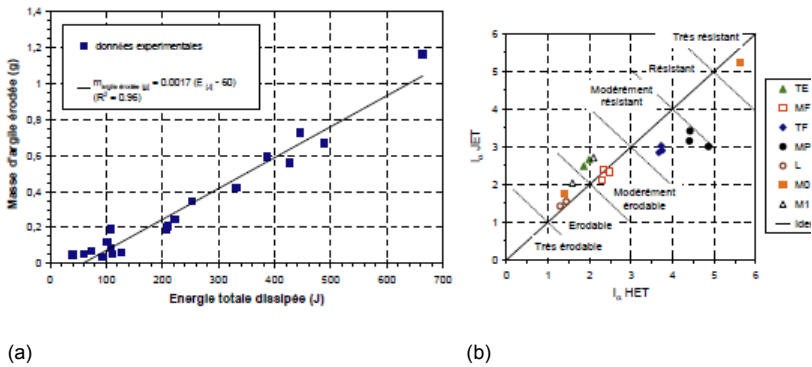


Fig. 8

- (a) Masse sèche d'argile érodée versus énergie totale dissipée
- (b) $I_{a, \text{JET}}$ fonction de $I_{a, \text{HET}}$ et classification de la sensibilité à l'érosion.
 - (a) *Eroded clay mass versus total dissipated energy*
 - (b) *$I_{a, \text{JET}}$ versus $I_{a, \text{HET}}$ and susceptibility to erosion.*

4.6. CLASSIFICATION UNIQUE POUR LE HET ET LE JET

L'énergie dissipée par érosion $E_{\text{érosion}}$ est déterminée pour les essais HET et JET. Un indice de résistance à l'érosion [15] est défini par:

$$I_{\alpha} = -\log_{10} \left(\frac{\text{masse sèche érodée}}{E_{\text{érosion}}} \right) \quad [10]$$

La Fig. 8(b) représente les valeurs de l'indice I_{α} obtenues avec le JET ($I_{\alpha, \text{JET}}$) en fonction des valeurs avec le HET ($I_{\alpha, \text{HET}}$). A partir des valeurs de I_{α} pour les deux érodimètres, une corrélation linéaire peut être établie sous la forme : $I_{\alpha, \text{JET}} = 0,58 I_{\alpha, \text{HET}} + 0,97$ (coefficient de corrélation: $R^2 = 0,79$ [13]). En fonction des valeurs de l'indice de résistance à l'érosion et en prenant en compte les classifications présentes dans la littérature, six catégories de sensibilité à l'érosion d'interface sont proposées : très érodable pour $I_{\alpha} < 1$, érodable pour $1 \leq I_{\alpha} < 2$, modérément érodable pour $2 \leq I_{\alpha} < 3$, modérément résistant pour $3 \leq I_{\alpha} < 4$, résistant pour $4 \leq I_{\alpha} < 5$ et très résistant pour $I_{\alpha} \geq 5$. Pour les deux érodimètres utilisés, une classification identique de la sensibilité à l'érosion d'interface des différents sols testés est donc obtenue grâce à l'approche énergétique.

4.7. COMPARAISON DE L'INTERPRÉTATION ÉNERGÉTIQUE AVEC LES AUTRES APPROCHES

L'approche énergétique est à la fois simple et efficace pour classer la sensibilité à l'érosion. Si l'interprétation traditionnelle du HET et du JET est moins efficace que l'approche énergétique pour quantifier les effets d'une érosion, elle a cependant été améliorée depuis cette comparaison avec un mode opératoire plus précis, ensuite elle reste toujours utile pour fixer le seuil d'érosion, qui est un paramètre capital pour la sécurité des barrages. Ainsi ce seuil doit être déterminé par l'appareillage qui représente au mieux les conditions hydrauliques extrêmes auxquelles le sol doit être soumis : HET pour l'érosion de conduit et JET pour l'érosion externe.

5. ÉVALUATION DU RISQUE D'ÉROSION INTERNE

5.1. IDENTIFICATION DES DÉFAUTS POTENTIELS

Le troisième volume des comptes-rendus du projet Erinoh est une aide à l'évaluation du risque d'érosion interne sur ouvrage réel. Ce guide, à vocation pédagogique, introduit les problèmes à partir des manifestations de l'érosion interne observées en remblai, en fondation et le long d'ouvrages traversant lors d'incidents. Ces incidents sont la conséquence d'un ou plusieurs mécanismes qui ont été reproduits en laboratoire et dont les lois d'érosion et leurs conditions aux limites sont rappelées. A l'origine de ces mécanismes, on retrouve très souvent un ou plusieurs défauts qui en sont les initiateurs d'érosion. Le guide fait un inventaire des défauts mis en évidence par le retour d'expérience. Ces défauts potentiels sont écartés ou révélés dans un premier temps par : (1) l'analyse fonctionnelle de la conception et de la construction qui évalue l'état des barrières de défense (2) l'inspection visuelle qui cartographie les observations d'anomalies (3) l'analyse comportementale qui confronte les résultats d'auscultation aux prédictions initiales ou réévaluations ultérieures. Cet inventaire de défauts potentiels fait partie de l'analyse de l'initiation de l'érosion interne, elle est la première étape du processus d'évaluation du risque d'érosion interne. Elle intègre l'analyse des situations extrêmes : crues, séismes et glissements de terrain. Elle consiste à confronter tout barrage à cette liste, pour répondre de leur présence ou de l'occurrence de chaque initiateur sur le site étudié.

5.2. DÉTECTION, LOCALISATION ET CARACTÉRISATION DES DÉFAUTS EXISTANTS

Si un ou plusieurs défauts initiateurs d'érosion interne sont suspectés, il est alors essentiel de les détecter, de les localiser et de les caractériser. Les méthodes de détection géophysiques sont particulièrement adaptées aux petits barrages.

Parmi elles, les méthodes thermométriques sont les plus efficaces. La température est le meilleur traceur des fuites, distinguant les eaux de la retenue des eaux de nappe. Elle peut être mesurée préventivement par fibre optique ou en maintenance curative au travers de piézomètres ou de tubes battus (brevet GTC). Les mesures sont ponctuelles dans le temps pour la phase de détection, ou continues pour caractériser la vitesse d'infiltration, par mesure du temps de décalage entre les variations de température de la fuite et celles de l'eau de la retenue. Il est possible ainsi d'avoir une idée assez précise du débit total de fuite, en revanche la méthode ne donne pas forcément la vitesse maximale à cause de la fonction de transfert liée à la chaîne de mesure.

Les méthodes électriques et électromagnétiques sont aussi très efficaces. La polarisation spontanée est très appréciée pour détecter l'entonnement ou la résurgence d'écoulements préférentiels, mais son domaine d'application est un écoulement laminaire. Quand l'écoulement est turbulent, la méthode sonique, qui consiste à enregistrer le bruit par un géophone positionné aux nœuds d'un maillage le long du parement amont est plus efficace. Une fois l'entonnement détecté, il est important d'évaluer la vitesse d'infiltration pour connaître le niveau d'érosion. Les essais de traçage à la fluorescéine sont à privilégier en fondation rocheuse ou meuble très perméable (perméabilité $k > 0.1$ m/s), les essais à la saumure sont bien adaptés aux sols perméables (0.1 m/s $> k > 0.3$ m/s) tandis que les mesures thermométriques prennent le relais pour les perméabilités inférieures. Lorsque la résurgence est connue, il est possible de localiser l'écoulement préférentiel par une méthode électrique qui mesure le changement de potentiel lorsqu'un courant électrique est injecté dans la résurgence. Si les fuites sont seulement détectées par ces méthodes, l'érosion interne est bien mise en évidence par leur hausse à conditions identiques.

D'autres méthodes apportent des compléments utiles. Les mesures d'analyses physico-chimiques de l'eau sont un excellent moyen de séparer les eaux de fuite des eaux de nappe ou de ruissellement. Les mesures d'ondes sismiques peuvent mettre en évidence des zones déconsolidées dans les grands barrages. La mesure de la turbidité dans le débit de fuite est une des rares à caractériser l'érosion, mais elle reste difficile d'interprétation.

5.3. CONTINUATION DE L'ÉROSION INTERNE OU ABSENCE DE RÉTENTION

Une fois les défauts localisés, il convient de vérifier si l'érosion interne initiée est stoppée ou non par un filtre. Le retour d'expérience du chapitre 2 montre l'efficacité de cette barrière. Dans un premier temps, il convient de vérifier la présence du filtre. Dans un second temps, il convient d'évaluer l'efficacité du filtre ou des conditions de filtration des ouvrages qui ne sont pas dotés de filtre. La qualité de la filtration est non seulement évaluée par le respect des règles de filtre, Vaughan pour les sols dispersifs, Terzaghi ou Fell pour les autres, mais aussi par le respect d'autres fonctionnalités du matériau filtrant : absence de cohésion, absence de traction ou claquage hydraulique, drainage du sol à filtrer et absence d'attrition. Si ces critères de filtre ne sont pas respectés, il faut s'assurer que le critère d'érosion permanente de Foster et Fell ne soit pas dépassé [1]. Si le critère d'érosion permanente est dépassé, alors la situation est dangereuse et à rectifier. Une exception est possible quand absence de filtration et absence d'initiation sont observées sur un ouvrage. Ces situations demandent des vérifications scrupuleuses et reposent sur des critères hydrauliques affectés d'une marge de sécurité importante.

5.4. LIMITES D'EMPLOI DES CRITÈRES D'INITIATION DE L'ÉROSION INTERNE

Bien que de nombreux remblais homogènes sans filtre tiennent sans incident, la démonstration de leur tenue ultérieure reste problématique. Le danger principal est l'érosion de conduit, dont l'initiation a pour seuil la contrainte critique. Dans ce cas, non seulement la variabilité de la contrainte critique doit être prise en considération, mais en plus les conditions ultérieures ne doivent pas engendrer des défauts dans le remblai (animaux fouisseurs, conduites, fissures de dessiccation). Le problème peut être abordé avec une approche probabiliste [19].

L'initiation de l'érosion régressive dépend d'un critère hydraulique donné en gradient critique par Sellmeijer [8] et Hoffmans [20]. Si Sellmeijer trouve un effet d'échelle sur la valeur de ce seuil, Hoffmans montre que cet effet peut être relié à la vitesse critique de transport dans le chenal d'érosion. Or cette vitesse dépend de la puissance de l'aquifère drainé par le chenal d'érosion. Pour capturer cet effet d'échelle, il est opportun d'utiliser les deux approches et de prendre la valeur la plus pessimiste.

L'initiation de l'érosion de contact est assez précise. Pour une interface entre le gravier et le limon, une vitesse de Darcy de 1cm/s est un critère préliminaire en absence d'essai spécifique au matériau du site, car ce fut le seuil minimum mesuré. Des essais s'imposent si des vitesses de Darcy de cet ordre de grandeur ont été détectées.

L'initiation de la suffusion est moins évidente à déterminer. Ce mécanisme initie successivement le détachement, le transport et le dépôt. Le premier seuil est l'arrachement du premier grain, le second est le transport d'une fraction donnée du volume et le dernier est le colmatage de l'exutoire du matériau par le transport massif des fines. Le dernier seuil est le plus dangereux et de loin, car il peut engendrer un claquage hydraulique sous le colmatage. Li [9] l'a exprimé en gradient hydraulique critique par Eq. [11]:

$$i_{cr} = \alpha \left(\frac{\sigma'_{t0}}{\gamma_w \Delta z} + \frac{\gamma'}{\gamma_w} \right) \quad [11]$$

avec α : facteur de réduction de la contrainte effective, σ'_{t0} : contrainte effective verticale en tête de l'échantillon de sol, Δz : hauteur de l'échantillon, γ' : poids volumique déjaugé et γ_w : poids volumique de l'eau. Ce seuil est dépendant de l'état de contrainte, il est à appliquer pour évaluer le risque de claquage hydraulique qui semble la situation la plus probable de rupture. Un autre cas possible, encore jamais rencontré en France, est la liquéfaction statique ou sismique.

6. CONCLUSION

Le Projet National Erinoh est un projet de Recherche et Développement, lancé par l'IRES, avec le soutien de l'État, qui a permis une meilleure connaissance des mécanismes d'érosion interne. Trois guides en sont issus : le premier détaille les essais d'érosion interne disponibles en France avec leur mode opératoire, leur modèle d'interprétation et leur domaine d'application, le second introduit les méthodes de détection de fuite et d'érosion sous forme d'une trentaine de fiches, quant au troisième, il a pour objectif de présenter les mécanismes d'érosion interne observés sur site, de les relier aux essais de laboratoire pour évaluer le risque d'initiation et de continuation de l'érosion interne.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'IRES, le Projet National ERINOH et la Région Pays de la Loire dans le cadre respectivement d'un contrat de recherche et des projets régionaux R2GC et EMERMOD pour leur soutien financier.

RÉFÉRENCES

- [1] Fell R. and Fry J-J. Internal Erosion of Dams and their Foundations. Taylor & Francis edition 2007.
- [2] Internal Erosion Working Group. European Club of ICOLD. Intermediate Report. 2007. Freising, Germany
- [3] Bonelli S. 2012. Erosion of Geomechanics. ISTE Wiley Edition
- [4] Bonelli S. 2013. Erosion in Geomechanics applied to Dams and Levees. ISTE Wiley Edition
- [5] Chevalier C. & Bonelli S. (coord.) 2014. Guide ERINOH vol.1: Méthodologie de caractérisation expérimentale (in French).
- [6] Francois D. (coord.) 2014. Guide ERINOH vol.2: Méthodes de détection (in French).
- [7] Deroo L. & Fry J.J. (coord.) 2014. Guide ERINOH vol. 3: Approches et besoins en matière d'ingénierie (in French).
- [8] Van Beek V.M., Yao Q., Van M. et al. Validation of Sellmeijer's model for backward piping under dikes on multiple sand layers, 6th ICSE Paris 2012
- [9] LI M., "Seepage induced failure of widely graded cohesion-less soils", PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, BC, 2008
- [10] Hanson G.J., Simon A. (2001). Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern U.S.A. Hydrological processes, Vol. 15, N°1, 23 – 38.
- [11] Briaud J.L., Ting F., Chen H.C., Cao Y., Han S.W. and Kwak K. "Erosion Function Apparatus for scour rate predictions", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(2), 105-113, 2001.
- [12] Regazzoni P.L., "Confrontation et analyse d'érodimètres et caractérisation de la sensibilité à l'érosion d'interface", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2009.
- [13] Regazzoni P-L, Marot D. (2013). A comparative analysis of interface erosion tests. Natural Hazards, Vol. 67(2), 937 – 950.
- [14] Dao L. Q., Souli H., Courivaud J-R, Fry J-J, Pinettes P., Fleureau J-M, Effect of test parameters on the results of the « Jet Erosion Test » Paper 21 ICSE 6 Paris - August 27-31, 2012.
- [15] Marot D., Regazzoni P.L., Wahl. (2011). Energy based method for providing soil surface erodibility rankings. Journal of Geotech. and Geoenv. Eng., Vol. 137(12), 1290 – 1294.
- [16] Marot D., Le V. D., Garnier J., Thorel L., Audrain P. (2012). Study of scale effect in an internal erosion mechanism. EJECE, Vol. 16(1), 1 – 19.
- [17] Beltaos S., Rajaratnam N. (1974). Impinging circular turbulent jets. Journal of the hydraulics division, Vol. 100(HY10), 1313 – 1328.
- [18] Hanson G.J., Cook K.R. (2004). Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility in-situ. ASAE, Vol. 20, N°4, 455 – 462.
- [19] Mallet T. & Outalmit K. (2014) Probability of failure of an embankment by internal erosion using the Hole Erosion Test. International Symposium

- on Dams in a global environmental challenges Paper 367 CIGB Bali June 1-6 2014
- [20] Hoffmans G. J. C. M. (2012) The Influence of Turbulence on Soil Erosion. Eburon Uitgeverij B.V. Scour (Hydraulic Engineering)
- [21] Annandale G. W.. (1995) Erodibility Journal of Hydraulic Research, Vol. 33, N°4, pp. 471-494, February.

RÉSUMÉ

Ce rapport traite de l'érosion interne. En France, chaque année un ouvrage hydraulique est victime d'une rupture par érosion interne. La réduction de ce risque de rupture par érosion interne fut l'enjeu d'un projet national de recherche appelé Erinoh. Le diagnostic que porte Erinoh sur ce risque est détaillé à trois niveaux :

1. au niveau du laboratoire par des essais d'érosion reproduisant la pathologie du site sur des échantillons prélevés intacts ou recompactés,
2. au niveau du site par la localisation de défauts (fuites, cavités ou autres anomalies) par des méthodes de détection et de suivi éventuel de ces défauts,
3. au niveau du bureau d'études par l'analyse fonctionnelle, l'analyse comportementale et l'application de règles d'ingénierie sur les filtres et les seuils d'érosion.

Chaque niveau d'analyse fait l'objet d'un guide. Ce rapport rappelle quelques résultats du projet Erinoh et renvoie pour une mise en pratique de chacun de ces niveaux d'analyse aux publications.

SUMMARY

This report deals with internal erosion. In France, every year, one hydraulic earthen structure (small dam, canal or flood embankment) is breached by internal erosion. The mitigation of the risk of internal erosion was the purpose of a national research program called Erinoh. The risk assessment of internal erosion made by Erinoh is reported in three steps:

1. laboratory tests: main mechanisms of internal erosion are evaluated in lab tests on intact or compacted samples,
2. methods of detection on site : the flaws or defects on site (leaks, cavities, other anomalies) are localized and sometimes monitored by accurate methods of detection,

Q. 98 – R. 32

3. engineering methods : the risk assessment is finally driven by functional analysis, behaviour assessment and engineering rules based on filter criteria and erosion thresholds.

Every step is described in a handbook. This report presents some outputs of the Erinoh Project and invites the practitioners to read the 3 handbooks for applications.